

文章编号:1671-6833(2013)04-0110-05

VHF 航空信道下一种多机协作通信新方法

王忠勇¹, 党刚¹, 元洪波², 张大鹏²

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 空军第一航空学院 航空电子工程系, 河南 信阳 464000)

摘要: 针对航空通信中各种干扰导致的高误码率问题, 对有无直接链路的情形分别提出多机协作通信提高分集增益的方法. 该方法在机载通信设备调制技术和发射功率不变的条件下实现了高速率传输, 有效抵抗多径衰落, 扩大通信范围. 通过分析 VHF 信道中是否存在直接链路, 给出了基于航空信道模型的放大转发和解码转发协作通信方式, 用最大比合并的方法提高了接收端的信噪比. 仿真结果表明, 在给定的空空和空地信道参数下, 在直接链路存在下多机 DF 协作的误码性能最优, 在无直接链路存在下多机 AF 协作的误码性能最优.

关键词: 航空信道; 放大转发 (AF); 解码转发 (DF); 多机协作通信

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.026

0 引言

在航空通信系统中, 空中交通管制 (ATC) 和空中交通管理 (ATM) 已经在安全旅行和物资运输等领域广泛应用. 随着空中交通量的预期性增长, 飞机数量的骤增和噪声干扰的加重, ATC 和 ATM 中的容量将会达到饱和. 在未来的空中交通管制中, 飞机的天线数量和功率资源将面临巨大的挑战. 协作通信^[1-2] 系统通过通信终端分享其它终端的天线而构成无线虚拟 MIMO 系统, 它不但能用单天线获得分集增益, 还能在不扩展频带和发射功率不变的条件下实现高速率数据传输, 有效地抵抗多径衰落, 克服功率和容量的极限. 使用 VHF 频段的航空信道中, 单个飞机和塔台通信时, 由于路径损耗和发射功率的限制, 在一定飞行距离时两者不能正常通信; 另外, 飞机的高速移动, 载波频率高, 信道条件非常复杂, 以至于形成传输信息途径多种多样的时变衰落信道. 笔者采用多机协作提高传输质量.

文献[3]中分析了飞行器近进中的自适应放大转发 (Amplify-and-Forward, AF) 的协作传输方案, 文献[4]应用解码转发 (Decode-and-Forward, DF) 分析航空通信中的中继吞吐量, 但是两者并没有比较 AF 和 DF 的误码性能. 笔者在有无直接

链路情形下, 分别述评比较了 AF 和 DF 的误码率. 在接收端采用最大比合并 (MRC), 应用 BPSK 调制技术分析误码性能. 仿真结果表明, 在空空和空地信道参数下, 以 $BER = 10^{-5}$ 处, 应用单中继协作通信比无协作通信时至少提高了 3 dB 的增益, 多中继协作通信比单中继协作通信至少提高了 2 dB 的增益.



图1 两飞机单塔台协作通信系统拓扑结构

Fig.1 The topological structure of cooperative communication pattern with two airplanes and single tower

1 航空信道模型

考虑如图1所示的两飞机单塔台协作通信方式, 飞机1作为发射源, 飞机2是中继点, 两者还可以相互为中介进行通信; 塔台为目的节点; 飞机1到塔台为直接链路. 文献[5]分析了航空信道中传输衰落特性, 并建立了分场景模型, 此模型分为巡航、滑行、起飞降落、停靠, 巡航场景可表示

收稿日期:2013-02-20; 修订日期:2013-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172086).

作者简介:王忠勇(1965-),男,江西遂川人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事通信信号处理, E-mail:iezywang@zzu.edu.cn.

为空空信道或空地信道.图1中S-R是空空信道,R-D和S-D是空地信道.信道模型引用Bello提出的广义平稳非相关散射模型(WSSUS)^[6],时变脉冲响应为

$$h(t, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{j\theta_n} \cdot e^{j2\pi f_{D_n} t} \cdot \delta(\tau - \tau_n). \quad (1)$$

$h(t, \tau)$ 为协作过程中的信道衰落系数.其中, θ_n 是相位; f_{D_n} 为多普勒频率; τ_n 为时间延迟; N 为回波路径个数.基于蒙特卡罗理论,建立一个输出信号是均匀分布的 $u_n \in (0, 1)$, $g_{f_D}(u_n)$ 是无记忆非线性函数.则多普勒频移的表达式为: $f_{D_n} = g_{f_D}(u_n) = f_{D_{\max}} \cdot \cos(\varphi_{aL} + (\varphi_{aH} - \varphi_{aL}) \cdot u_n)$, φ_{aL} 为天线波束到达的最小角度, φ_{aH} 为天线波束到达的最大角度, $f_{D_{\max}}$ 为最大多普勒频移.时延表达式为: $\tau_n = g_{\tau}(u_n) = -\tau_{\text{slope}} \cdot \log_e(1 - u_n(1 - e^{-\tau_{\max}/\tau_{\text{slope}}})) \approx -\tau_{\text{slope}} \cdot \log_e(1 - u_n)$,由 $\tau_{\max} \gg \tau_{\text{slope}}$, τ_{slope} 是时延功率谱的斜率.

2 航空协作通信

航空通信中AF和DF均采用时分双工(TDD)模型^[7],这种模型的数据传输分为两个时隙.多中继协作通信时,假设各中继在正交信道上发送,因此没有中继间的干扰.在接收端假设已知完全的信道状态信息(CSI).

2.1 AF和DF的过程描述

AF结构简单,只在中继节点对接收的信号做简单的放大,不对信号做任何译码操作,目的点对点源节点到中继的信道衰落进行理想均衡;DF是在中继节点对接收的源信号先进行译码和估值再转发给目的节点.以下针对AF和DF协作过程的两个时隙加以介绍.

时隙1,从飞机1到塔台和飞机2的接收信号是 $y_{s,d}$ 和 y_{s,r_1} 为

$$y_{s,d} = \sqrt{P_0} h_{s,d} x + \eta_{s,d}; \quad (2)$$

$$y_{s,r_1} = \sqrt{P_0} h_{s,r_1} x + \eta_{s,r_1}. \quad (3)$$

式中: P_0 是飞机1的发射功率; $h_{s,d}$ 和 h_{s,r_1} 分别为飞机1到塔台和飞机1到飞机2的信道衰落系数; $\eta_{s,d}$ 和 η_{s,r_1} 是高斯白噪声,均值均为0,方差均为 N_0 .

时隙2,飞机2到塔台的接收信号是 $y_{r_1,d}$ 为

$$y_{r_1,d} = \sqrt{P_1} h_{r_1,d} \cdot q(y_{s,r_1}) + \eta_{r_1,d}. \quad (4)$$

式中: P_1 是飞机2的发射功率; $h_{r_1,d}$ 为飞机2到基站的信道衰落系数; $\eta_{r_1,d}$ 是加性高斯白噪声; $q(y_{s,r_1})$ 是中继节点采用的处理方式.

在塔台采用MRC,接收端的接收信号为

$$y = a_s y_{s,d} + a_1 y_{r_1,d}. \quad (5)$$

式中: a_1 和 a_s 为加权因子.

对多个中继节点的情况,若中继节点数用 k 表示,在接收端总接收信号可以表示为

$$y = a_s y_{s,d} + \sum_{k=1}^N a_k y_{r_k,d}. \quad (6)$$

式中: a_k 是第 k 个加权因子.

2.2 航空信道协作分析

VHF频段的载波在只有路径损耗时可传输数百公里.如图1所示,当飞机1的发射功率一定,飞机1和塔台超过传输最远距离时,直接链路将不存在.笔者以是否存在直接链路分为两种情形来讨论.

2.2.1 存在直接链路情形

文献[8]以移动通信为考虑环境和直接链路存在的条件下,分析了在协作通信中性能提升的多种技术.本文则考虑在航空信道的环境下,引入协作通信提高误码性能.

AF过程,单中继协作时公式(4)写为

$$y_{r_1,d} = \beta_1 h_{r_1,d} y_{s,r_1} + \eta_{r_1,d}; \beta_1 = \frac{\sqrt{P_1}}{\sqrt{P_0 |h_{s,r_1}|^2 + N_0}}. \quad (7)$$

把(2)和(7)代入公式(5)得出单中继协作的接收信号表达式,式中 $a_s = \frac{\sqrt{P_0} h_{s,d}^*}{N_0}$, a_1

$$= \frac{\sqrt{P_0 P_1} h_{s,r_1}^* h_{r_1,d}^* / \sqrt{P_0 |h_{s,r_1}|^2 + N_0}}{(P_1 |h_{r_1,d}|^2 / (P_0 |h_{s,r_1}|^2 + N_0) + 1) N_0}.$$

在多中继协作时,

$$y_{r_k,d} = \beta_k h_{r_k,d} y_{s,r_k} + \eta_{r_k,d}, \quad (8)$$

$\eta_{r_1,d}$ 和 $\eta_{r_k,d}$ 是同分布的;其中

$$a_k = \frac{\sqrt{P_0 P_k} h_{s,r_k}^* h_{r_k,d}^* / \sqrt{P_0 |h_{s,r_k}|^2 + N_0}}{(P_k |h_{r_k,d}|^2 / (P_0 |h_{s,r_k}|^2 + N_0) + 1) N_0}, \quad (9)$$

P_k 是第 K 个中继节点飞机的发射功率;中继放大

系数表示为 $\beta_k = \frac{\sqrt{P_k}}{\sqrt{P_0 |h_{s,r_k}|^2 + N_0}}$, a_s 不变.把公

式(2)和(8)代入公式(6),同时把 a_s , β_k 和 a_k 代入(6)式,得到多中继协作的接收信号.

DF过程,单中继协作时公式(4)变换为

$$y_{r_1,d} = \sqrt{P_1} h_{r_1,d} \hat{x} + \eta_{r_1,d}. \quad (10)$$

式中: \hat{x} 是在无循环冗余检验(CRC)的条件下中

继译码后的信号,可以用相关 ML 调制表示为 $\hat{x} = \arg \min_{x \in \theta} |y_{s,r_1} - h_{s,r_1}x|^2$, 其中 θ 表示 θ 进制星座的基数,笔者由于采用 BPSK 调制,即 $\theta = 2$. 把式(2)和(10)代入式(5)得出单中继协作的接收信号表达式,其中 $a_s = \frac{\sqrt{P_0}h_{s,d}^*}{N_0}$, $a_1 = \frac{\sqrt{\tilde{P}_1}h_{r_1,d}^*}{N_0}$.

在多中继协作时,

$$y_{r_k,d} = \sqrt{\tilde{P}_k} h_{r_k,d} \hat{x}_k + \eta_{r_k,d}, \quad (11)$$

$$a_k = \frac{\sqrt{\tilde{P}_k} h_{r_k,d}^*}{N_0}. \quad (12)$$

式中: \tilde{P}_k 是中继译码正确时 $\tilde{P}_k = P_k$, 否则 $\tilde{P}_k = 0$, P_k 是第 K 个中继节点飞机的发射功率; $\hat{x}_k = \arg \min_{x \in \theta} |y_{s,r_k} - h_{s,r_k}x|^2$, a_s 不变. 把(2)和(11)代入公式(6),同时 a_s 、 a_k 和 \hat{x}_k 代入式(6)得到多中继协作的接收信号.

2.2.2 不存在直接链路情形

VHF 频段的飞机 1 到塔台超过了传输最远距离,需要中继点转发,增加传输距离,同时也增加了通信的范围. 如图 2 所示,这是多中继单源点单目的节点的并行中继网络. 文献[9]中分析了并行无记忆信道中的转发互信息量(MIF),笔者把并行中继网络用到航空信道环境中,并以两个中继节点作为多中继的条件来分析.

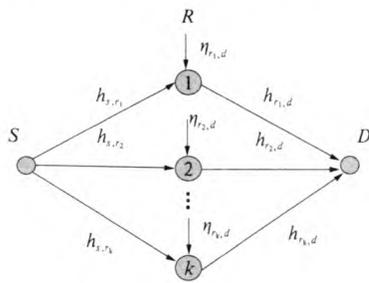


图 2 并行中继网络图

Fig. 2 The parallel relay network

在 AF 协作时,单中继节点的接收信号为

$$y_{AF} = \beta_1 y_{s,r_1} h_{r_1,d} + \eta_{r_1,d}. \quad (13)$$

多继节点的接收信号为

$$y_{AF2} = a_1 y_{r_1,d} + a_2 y_{r_2,d}, \quad (14)$$

式中: $y_{r_1,d}$ 和 $y_{r_2,d}$ 由公式(8)得出; a_2 和 a_1 可有公式(9)得出.

在 DF 协作时,单中继节点的接收信号为

$$y_{DF} = \sqrt{P_1} h_{r_1,d} x + \eta_{r_1,d}. \quad (15)$$

多中继节点的接收信号为

$$y_{DF2} = a_1 y_{r_1,d} + a_2 y_{r_2,d}. \quad (16)$$

式中: $y_{r_1,d}$ 和 $y_{r_2,d}$ 由公式(11)得出; a_2 和 a_1 可有公式(12)得出.

3 仿真结果及分析

根据前面的公式推导,采用 BPSK 调制方式进行 Matlab 仿真. 笔者讨论的是单收发天线,载波频率是 100 MHz,方差 $N_0 = 1$. 仿真环境是空空和空地信道,仿真参数由文献[5]导出,如表 1 所示. 其中, ν 为飞行速度, τ_{max} 为最大时延. 仿真时多中继协作都是假设在两个中继点的情况下进行的.

表 1 空空信道和空地信道两种场景的仿真参数

Tab. 1 The simulation parameters of air-to-air channel and air-to-ground channel

信道	$\nu /$ ($m \cdot s^{-1}$)	$\tau_{max} /$ μs	N	$\varphi_{aL} /$ ($^\circ$)	$\varphi_{aH} /$ ($^\circ$)
空空	620	66	20	178.25	181.75
空地	440	33	20	178.25	181.75

图 3(a) 为存在直接链路时的协作性能比较,其中无协作条件下的误码率最大,无协作也就是只有直接链路时的信号传输. 从图 3(a)可以看出,单中继协作比无协作的误码性能要好,这是引入空间分集的优点;多中继协作优于单中继协作的误码性能,这是由于多中继可形成虚拟的天线阵列,加强了信息传输和抵抗多径衰落. DF 协作比 AF 协作的误码性能有显著的改善,这是 DF 在直接链路存在下保证了信号传输质量,而且 DF 中继节点不放大噪声. 在 $BER = 10^{-5}$ 处,单中继 AF 比无协作时有 3 dB 的提高;单中继的 DF 比 AF 有 2 dB 的增益提高;多中继 DF 比单中继 DF 有 4 dB 的提高;多中继 DF 比多中继 AF 有 2 dB 的提高.

图 3(b) 为无直接链路情形下的协作性能比较. 从图中可以看出,在信噪比低的情况下 AF 的抗干扰能力很差,甚至多中继协作的 AF 比单中继协作的 DF 还差. 由于 AF 的中继节点在放大信号的同时也放大了噪声,并且信噪比低时噪声干扰严重. 随着信噪比的增加,AF 比 DF 降低误码率的速度明显加快. 由于 DF 在中继点处译码可能不正确,这就受限于联合链路的较小互信息量,也由于缺少直接链路在接收端的信息传输保障. 从总体来看,多中继协作比单中继协作分集增益

高. 在 $BER = 10^{-5}$ 处, AF 的多中继协作比单中继协作增加 9 dB 分集增益; DF 的多中继协作比单中继协作增加 11 dB 分集增益; AF 多中继协作比 DF 多中继协作增加 3 dB 分集增益.

由仿真结果可以看出,在直接链路存在下多

中继 DF 误码性能最优,在 $BER = 10^{-5}$ 处比无协作情况增加 9 dB 的增益;在无直接链路存在下多中继 AF 最优,在 $BER = 10^{-5}$ 处比单中继 DF 增加了 13.5 dB 的增益.

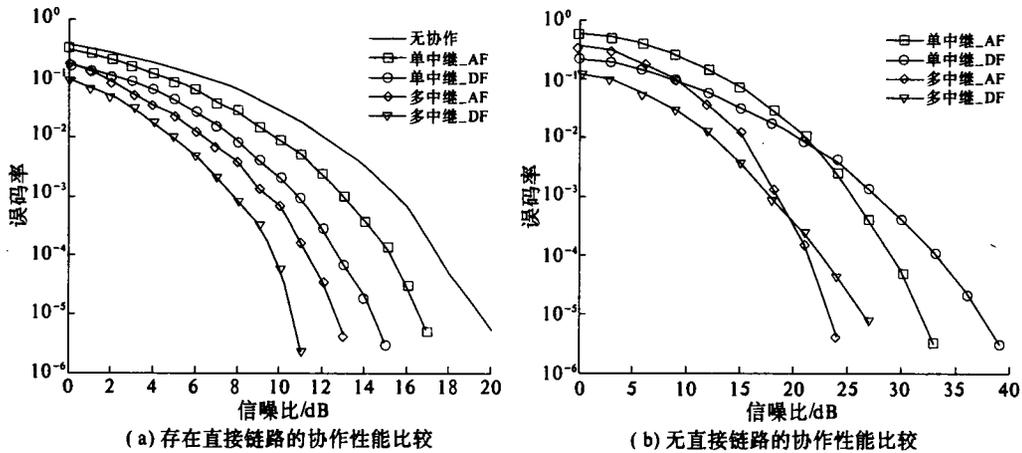


图3 两种情形的仿真图

Fig.3 The simulation diagram of two cases

4 结论

笔者提出了基于 AF 和 DF 在是否存在直接链路的航空多机协作通信方案,推导了在接收端已知精确信道状态信息条件下的协作通信表达式,用最大比合并构成一个接收端优化信噪比的方法.分析了在航空通信中多机协作方案的可靠性.基于这种方案,在是否存在直接链路的情形下,选用多机 AF 或 DF 协作方式,更能有效克服高误码率的问题.我们也得出多机协作在航空通信中的应用扩大了通信的覆盖面积,节约了发射功率,有效克服了航空通信中的多径效应.

参考文献:

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans, Information Theory, 2004, 50(12):3062-3080.
- [2] CHEN De-qiang, LANEMAN J N. Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems. IEEE Trans, Wireless Commun [J]. 2006, 5(7): 1785-1794.
- [3] 李国彦,张有光.飞行器近程中的自适应协同传输与节点选择[J].航空学报,2011,32(11),2083

-2095.

- [4] WANG Yu-feng, ERTURK C M, ARSLAN H, et al. Throughput and delay analysis in Aeronautical Data Networks[C]// Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on. Hawaii Maui: Qualcomm, 2012: 771-775.
- [5] HASS E. Aeronautical Channel Modeling [J]. IEEE Trans, Vehicular Technology, 2002, 51(2): 254-264.
- [6] BELLO P A. Aeronautical channel characterization [J]. IEEE Trans, Communications, 1973, 21(5): 548-563.
- [7] WANG Tai-ran, CANO A, GEORGIOS B, et al. High-Performance Cooperative Demodulation With Decode-and-Forward Relays [J]. IEEE Trans, Communications, 2007, 55(4): 1427-1438.
- [8] LIU K J R, AHMED K S, SU Wei-feng, ANDRES K. Cooperative Communication and Networking [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 95-182.
- [9] KARIM M A, YUAN Jin-hong, CHEN Zhuo, et al. Soft Information Relaying in Fading Channels [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(3): 233-236.

A New Method for Multi-Aircraft Cooperative Communication in the VHF Aeronautical Channel

WANG Zhong-yong¹, DANG Gang¹, YUAN Hong-bo², ZHANG Da-peng²

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Aeronautic Electronic Engineering, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: In view of the high BER (Bit Error Rate) caused by a variety of interference in the aeronautical communications, this paper proposes the multi-aircraft cooperative communication scheme for the case that a direct link does or doesn't exist separately to improve the diversity gain in aeronautical channel. The proposed scheme could achieve high data rate, effectively resist multi-path fading, and expand the communication range in conditions of fixed airborne communication equipment modulation and constant transmission power. By analyzing whether there is a direct link for transmitting signals in VHF channel, we give both the amplify-and-forward and decode-and-forward cooperative communication mode based on the model of aeronautical channel. What's more, the maximum ratio combining method is utilized to improve the SNR (Signal to Noise Ratio) at the receiving end. Simulation results show that the multi-aircraft DF has optimal performance of BER when direct link exists, and the multi-aircraft AF has optimal performance of BER when direct link does not exist, when the parameters of air-to-air and air-to-ground channels are given.

Key words: aeronautical channel; amplify-and-forward (AF); decode-and-forward (DF); multi-aircraft cooperative communication

(上接第 109 页)

Rapid Determination of Lead, Manganese, and Iron in Gasoline with Atomic Absorption Spectrophotometry

YANG Zhi-ling

(Henan Province Product Quality Supervision and Inspection Center, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: An atomic absorption spectrophotometry method for the determination of Pb, Mn, and Fe in motor gasoline was studied. Digestion method for pretreatment of samples was proposed. And comparison of method between this work and national standard was carried out. The results showed that the linear relation between absorbance and ion concentration were good in the range of $0 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The correlation coefficients were all more than 0.999. The detection limit of Pb, Mn, and Fe which were all lower than the quantitative lower limits of national standard were $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.068 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and $0.012 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The average error and relative standard deviation of measurement were all lower than 0.02 which showed that the precision and accuracy of this method is satisfied. The values of recovery of Pb, Mn, and Fe were in the range of 92.5% ~ 98.1%, 95.6% ~ 106.2%, and 96.8% ~ 107.1%, respectively. It showed that the recovery is high and the method is accurate. The content of Pb, Mn, and Fe in five kinds of motor gasoline were determined by methods of this work and national standard with an average error lower than 3.5% which showed that the method is reliable.

Key words: atomic absorption spectrophotometer; gasoline; lead; manganese; iron